

Factores limitantes en la producción del biodiésel de *Jatropha curcas* L.

Ana Avellán¹, Segundo García¹, Gabriel Burgos¹, Carlos Moreira¹, Oswaldo García¹, Carlos Banchón²

¹Universidad Técnica de Manabí, Ciencias Físicas, Matemáticas y Químicas, Ing. Química, Portoviejo

²Universidad Agraria del Ecuador, Ciencias Agrarias, Ingeniería Ambiental, Guayaquil

aavellan1056@utm.edu.ec

Abstract— in order to reduce production costs of biodiesel, minimum transesterification conditions were herein evaluated. Limiting factors were determined to use calcium oxide and hydroxide catalysts, at different doses and concentrations in the transesterification of *Jatropha curcas* L. oil and methanol. It was determined that the presence of water, and content of free fatty acids (0,423-2,53% acidity) in the *Jatropha* oil are just a minimum inhibition factors, in comparison with atmospheric reaction conditions. In contrast, the 10:1 molar ratio of methanol and oil allowed a 98,9% yield of biodiesel when sodium hydroxide was used as catalyst. The same yield was obtained with or without oil esterification. In perspective, avoiding the poisoning of heterogeneous catalysts is still under study in the search for catalysts recovery from the reaction medium.

Index Terms—transesterification, nucleophilic reaction, oil, energy, biofuel.

I. INTRODUCCIÓN

SE estima un crecimiento energético mundial de hasta 701,6 cuatrillones de Btu para el año 2030, aumentando el consumo de petróleo, gas natural, carbón, y energía nuclear, debido a la creciente industrialización y población (Talebian-Kiakalaieh, Amin, & Mazaheri, 2013; Talebian-Kiakalaieh *et al.*, 2013). La disminución de las reservas de combustibles fósiles es evidente. Así mismo, el incremento de la contaminación atmosférica en las principales ciudades del mundo. Esto debido a que la contaminación por combustibles derivados del petróleo produce gases tóxicos como hidrocarburos, material particulado, dióxido de carbono, monóxido de carbono, dióxido de azufre, monóxido de nitrógeno y dióxido de nitrógeno (Harvey, 2016). Causa del calentamiento global, y es también afectación a la salud pública (Agarwal, 2017; Bilgili, 2016). Según la Agencia Internacional de Energía (AIE), de 2005 a 2030, la demanda de petróleo crecerá en 1,3% anual, ampliamente en línea con el PIB global promediando 1,7% de 2005 a 2015 y 1,1% de 2015 a 2030 (Chhetri, Watts, & Islam, 2008; Wright, 2006; Yaakob, 2013). Según proyecciones, la demanda de petróleo debería alcanzar los 116 millones de barriles por día para el año 2030 (Kulkarni & Dalai, 2006). Actualmente, Canadá consume 23 millones de toneladas de diésel anualmente, y el 46% de esto se utiliza en el sector del transporte. Estados Unidos consume 178 millones de

toneladas de diésel al año, y el consumo mundial es 934 millones de toneladas de diésel por año (De Angelis, Medeghini, Conte, & Mignardi, 2017).

Debido al daño que produce la generación energética de combustibles fósiles, es que se proponen alternativas eco-amigables como la producción de biocombustibles obtenidos de biomasa renovable que produzcan menos dióxido de carbono, compuestos orgánicos volátiles (COVs), y emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (Hosseinzadeh-Bandbafha, 2018; Vicente & Mart, 2004; Wright, 2006). El crecimiento de la producción de biocombustibles ha escalado recientemente. Siguiendo el escenario más optimista desarrollado por la Agencia Internacional de Energía (AIE), la participación de energía renovable en la generación de electricidad aumentará a 20% para 2050 desde 18,3% en 2002 (Bhattacharya, 2016; Gori, Ludovisi, & Cerritelli, 2007; Hirsch, Bezdek, & Wendling, 2005).

El biodiésel supera al diésel en términos de su contenido de azufre, contenido aromático y punto de inflamación. Esto es dado que el biodiésel es libre de azufre y no es aromático, mientras que el diésel convencional puede contener hasta 500 ppm de SO₂ y 20–40% en peso de compuestos aromáticos (Gerpen, 2005; Phan & Phan, 2008). Estas ventajas del biodiésel son solución clave para reducir el problema de la contaminación, ya que el sector del transporte es un importante contribuyente de emisiones totales de gases.

La *Jatropha curcas* L. (planta conocida como piñón) es de alto impacto industrial; especialmente su semilla, de la cual se extrae aceite que tiene propiedades similares al de palma, debido a su aplicación en lugar de queroseno y diésel (Lu *et al.*, 2009; Tiwari, Kumar, & Raheman, 2007). Por ende, es el piñón muy promovido para que las áreas rurales sean autosuficientes en combustibles, iluminación y fuerza motriz; también debido a su aplicación en la fabricación de jabón (Fukuda, Kondo, & Noda, 2001; Openshaw, 2000).

El objetivo de la presente es la investigación de factores limitantes en la producción del biodiesel a partir del aceite de piñón, en presencia de catalizadores como óxido de calcio, hidróxido de calcio (obtenidos de cáscara de huevo) e hidróxido de sodio. El presente trabajo aporta en la búsqueda de la disminución de costos de producción que implica el utilizar catalizadores homogéneos de un solo uso.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Catalizadores

Se utilizaron tres catalizadores a diferentes concentraciones: óxido de calcio 99,90% (Merck, USA), óxido de calcio 55,0% (Obtenido de cáscara de huevo), hidróxido de calcio 99,90% (Merck, USA), hidróxido de calcio 55,0% (Obtenido de cáscara de huevo), e hidróxido de sodio 99,90% (Merck, USA).

Para obtener el óxido de calcio, 1000 gramos de cáscaras de huevos se lavaron con abundante agua y detergente; luego se secaron al sol durante 12 horas. Las cáscaras fueron molidas hasta un diámetro aproximado de 5 mm y secadas durante dos horas a 100°C; y mediante posterior molienda se obtuvo un tamaño de partícula de aprox. 0,1 mm (Viriya-empikul *et al.*, 2010). Este polvo fue calcinado en mufla a 850°C durante 1 hora (Chavan, Kumbhar, Madhu, Singh, & Sharma, 2015). Mediante titulación con ácido clorhídrico 0,10 N (Merck, USA) y fenolftaleína se determinó el porcentaje de pureza del óxido de calcio obtenido (SASTA, 2015), según Ecuación (1). Se obtuvo 55% de pureza del CaO.

$$\% \text{ Pureza} = \frac{V * N * mEq_{CaO}}{m_{CaO}} * 100 \quad (1)$$

V = Volumen de ácido clorhídrico consumido

N = Normalidad del ácido clorhídrico

mEq_{CaO} = miliEquivalente químico del óxido de calcio

m_{CaO} = masa de muestra de óxido de calcio

Para la obtención del hidróxido de calcio, se agregaron 80 mL de agua destilada a 50 g de CaO; en aprox. 10 minutos, el agua se evaporó producto de la reacción exotérmica de conversión de óxido de calcio a hidróxido de calcio (Serio, Tesser, Pengmei, & Santacesaria, 2008).

B. Esterificación

Se aplicó un proceso de esterificación para reducir el porcentaje de ácidos grasos libres del aceite de piñón (Kamel, 2018). En un recipiente, se mezclaron 45,8 mL de metanol (99%) y 2,5 mL de ácido sulfúrico 98% (Merck, USA) durante un minuto. Se adicionó esta mezcla metanol-ácido sulfúrico junto con 100 g de aceite de piñón en un balón. Y se calentó hasta 60°C con agitación a 240 rpm durante una hora, hasta obtener un color anaranjado (Berchmans & Hirata, 2008). Se colocó la mezcla en un embudo de decantación para separar dos fases durante cinco minutos: la fase superior correspondiente al aceite esterificado y la fase inferior al exceso de metanol, respectivamente.

C. Transesterificación

La esterificación redujo la acidez del aceite de 2,53 a 0,5% y con este aceite se inició la transesterificación. Se aplicaron tres catalizadores a diferentes concentraciones. Primero, se mezclaron 45,8 mL de metanol (99% pureza) y una cantidad de la respectiva sal básica (Descrita en la Tabla 1): óxido de calcio, hidróxido de calcio o hidróxido de sodio, según el respectivo

tratamiento. Esta mezcla denominada metóxido de sodio o de calcio, se agitó durante 10 minutos a 240 rpm y a temperatura ambiente.

De forma paralela, se calentó 100 g de aceite de piñón hasta 60°C en un balón de reacción. Luego, se adicionó el respectivo

TABLA I
TRATAMIENTOS PARA OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL

Tratam.*	Catalizador	Tipo de reacción	Dosis de catalizador (g)
1	CaO 99,9%	Esterificado	1,00
2	CaO 99,9%	Esterificado	1,10
3	CaO 99,9%	No Esterificado	1,00
4	CaO 99,9%	No Esterificado	1,10
5	CaO 55,0%	Esterificado	1,00
6	CaO 55,0%	Esterificado	1,10
7	CaO 55,0%	No Esterificado	1,00
8	CaO 55,0%	No Esterificado	1,10
9	Ca(OH) ₂ 99,9%	Esterificado	1,00
10	Ca(OH) ₂ 99,9%	Esterificado	2,00
11	Ca(OH) ₂ 99,9%	No Esterificado	1,00
12	Ca(OH) ₂ 99,9%	No Esterificado	2,00
13	Ca(OH) ₂ 55,0%	Esterificado	1,00
14	Ca(OH) ₂ 55,0%	Esterificado	2,00
15	Ca(OH) ₂ 55,0%	No Esterificado	1,00
16	Ca(OH) ₂ 55,0%	No Esterificado	2,00
17	NaOH 99,9%	Esterificado	1,00
18	NaOH 99,9%	Esterificado	1,18
19	NaOH 99,9%	No Esterificado	1,00
20	NaOH 99,9%	No Esterificado	1,18

*Número de réplicas por tratamiento = 3

metóxido de sodio o de calcio al aceite. Esta reacción de transesterificación procedió durante una hora a 60°C y 240 rpm.

En un embudo de decantación, se separaron las fases producidas: la inferior correspondiente a glicerol y la superior a biodiesel. Se lavó el biodiesel con 35 mL de agua caliente (50°C) y agitación intensa (Huerga, 2014). Transcurridos 10 minutos, se decantó el agua con trazos de catalizador. Este procedimiento de limpieza se repitió 6 veces. Finalmente, se evaporó el agua residual presente en el biodiesel a 106°C durante dos horas.

D. Calidad del biodiésel

Se determinó la acidez tanto del aceite como del biodiésel. Para esto, se agregan 2 g de aceite o biodiesel a 10 mL de etanol en un matraz, y se añaden 2 a 3 gotas de fenolftaleína. Se agita bien la mezcla en un matraz, y desde una bureta se añade KOH 0,1 N gota a gota, hasta que aparezca un color rosa que persista por 30 segundos (García-Muentes, Lafargue-Pérez, Labrada-Vázquez, Díaz-Velázquez, & Sánchez del Campo-Lafita, 2018). Se aplica la siguiente formula:

$$\%Ac = \frac{c * N * mEq * 100}{m} \quad (2)$$

c = consumo de KOH

N = normalidad de KOH

mEq = miliEquivalente químico del aceite de *Jatropha curcas* L.

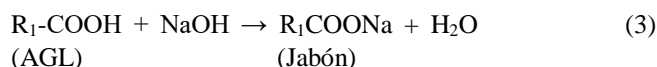
m = masa del aceite

La viscosidad cinemática y densidad fueron determinadas según métodos estándar ASTM-D-445 y ASTM-D-127, respectivamente.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La producción de biodiésel del presente trabajo consistió de los siguientes procesos: (i) esterificación con ácido sulfúrico para reducción de ácidos grasos libres, (ii) transesterificación con catalizadores alcalinos, (iii) lavado o purificación de biodiésel. Los factores que limitan la producción de biodiésel son discutidos según el rendimiento de la reacción (Fig. 1), saponificación (Fig. 2), y calidad del producto (Tabla II).

Los ácidos grasos libres (AGL) y el contenido de humedad tienen impactos negativos en la transesterificación cuando se utiliza un catalizador alcalino. El alto contenido de AGL es desfavorable en una reacción de transesterificación catalizada por álcalis, dado que los AGL reaccionarán con el catalizador para formar jabón (saponificación). Por tanto, la separación de productos será extremadamente difícil, resultando en un menor rendimiento de biodiesel, y formación de jabón (Fukuda *et al.*, 2001; Gerpen, 2005; Huerga, 2014; Koh, 2011). 65



En el aceite de piñón, la mayor parte de la composición de ácidos grasos es la del ácido oleico (43,8%), ácido linoleico (33,2%), ácido palmítico (14,9%), ácido esteárico (7,2%) y ácido palmitólico (0,8%). Así, el aceite crudo de piñón contiene aprox. 14% de AGL, por encima del límite de 0,5-1,0% considerado para la espontaneidad de la reacción de transesterificación en medio alcalino (Fukuda *et al.*, 2001; Koh, 2011). Por tanto, es de gran impacto la reducción de ácidos grasos libres mediante un proceso de esterificación en medio ácido, previa deshidratación del aceite (Gerpen, 2005). En el presente trabajo, se implementó una única etapa de esterificación. Esto debido a que el aceite de piñón tuvo una acidez de 2,53%, a pesar que una acidez menor a 2,0% no es inhibidor de la transesterificación (Huerga, 2014).

Como se muestra en la Fig. 1, el rendimiento de producción de biodiesel aumentó de 0 a 98% cuando se aumentó la dosis de 1,0 a 1,18% de catalizador NaOH. Esto es debido a la adsorción de algunos productos sobre la cantidad en exceso de la superficie del catalizador (Lu *et al.*, 2009; Ma & Hanna, 1999). Mientras que para los tratamientos con óxido e hidróxido de calcio, ya sea con una pureza de 55,0 ó 99,9%, los rendimientos fueron de 0% en todas las réplicas, a pesar de que el aceite fuera esterificado (Fig. 2). Este hecho remarca que, ni la pureza del catalizador ni su dosis impiden la transesterificación. Diversos autores coinciden que, el agua y la presencia de CO₂ en el medio son factores limitantes de la reacción, a pesar de la eficiencia atribuida al óxido de calcio en otros estudios (Chavan *et al.*, 2015; Wei, Xu, & Li, 2009).

Es notorio que, la presencia de agua produce efectos negativos durante la transesterificación del aceite, ya que un catalizador alcalino reaccionará con el AGL para formar jabón

y reducir la eficacia del catalizador (Koh, 2011). En pruebas experimentales, el aceite de piñón fue deshidratado a 100°C durante 1 hora para evaluar el efecto de la humedad en la transesterificación; como resultado, la presencia de agua tampoco fue ventaja para la transesterificación. No obstante, se ha reportado el efecto de la presencia de agua en una menor conversión debido a la hidrólisis de triglicéridos a diglicéridos para formar más AGL.

Las figuras 1 y 2 resumen los resultados de rendimiento de producción de biodiésel a diferentes dosis de catalizadores, a diferentes concentraciones cuando el aceite fuera esterificado y cuando no. La relación molar metanol-aceite fue 10/1 tanto para la esterificación como para la transesterificación (Demirbas, 2008).

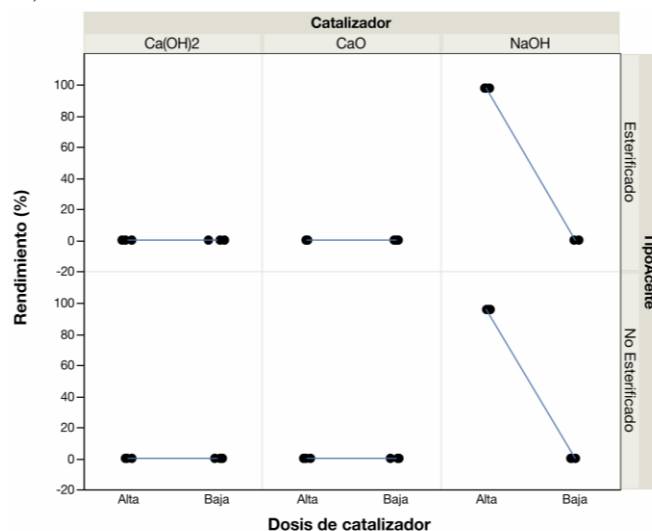


Fig. 1. Rendimiento de producción de biodiésel para dos tipos de aceite (esterificado y no esterificado) con dosis altas y bajas de los catalizadores $\text{Ca}(\text{OH})_2$, CaO y NaOH .

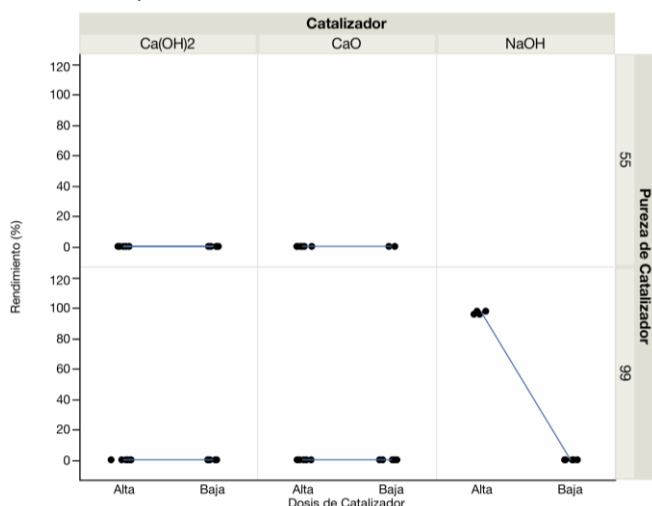
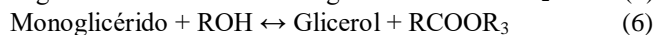
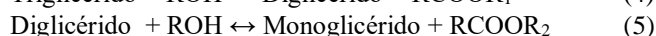


Fig. 2. Rendimiento de producción de biodiésel para dos tipos de aceite (esterificado y no esterificado) con dosis altas y bajas de los catalizadores $\text{Ca}(\text{OH})_2$, CaO y NaOH a diferentes concentraciones.

La transesterificación (alcoholólisis) es la reacción química en tres pasos reversibles que la conversión de triglicéridos (1 mol) y alcohol (3 moles) en presencia de un catalizador para formar ésteres y glicerol (Phan & Phan, 2008). Esta transesterificación

es la conversión de triglicéridos a diglicéridos, seguido de la conversión de diglicéridos a monoglicéridos. Los glicéridos se convierten en glicerol, produciendo un éster en cada paso, como se muestra en las Ecuaciones 4, 5 y 6. Para llevar a cabo la transesterificación, catalizadores de magnesio, óxidos de calcio y carbonatos de base y ácidos han sido investigados (Kumar & Sharma, 2008; Tiwari *et al.*, 2007). Al inicio de la reacción, el catalizador reacciona con el alcohol para producir anión alcóxido. En el primer paso, este alcóxido ataca al nucleófilo del triglicérido. El anión alcóxido en el grupo carboxilo del triglicérido forma un intermedio tetraédrico I. Este intermedio reacciona con la segunda molécula de alcohol para generar otro alcóxido y luego formar un intermedio II. Esos intermedios se reorganizarían para formar el éster y el glicerol (Demirbas, 2008; Juan, 2011).



En el presente trabajo, se obtuvo biodiésel mediante el catalizador NaOH, ya sea con aceite de piñón esterificado o no esterificado. La viscosidad del biodiesel (Tabla II) cumple con los requisitos de estándares estadounidenses y está cerca del rango de los estándares europeos para biodiesel que son 1,9 a 6,0 y 3,5 a 5,0 respectivamente (Berchmans & Hirata, 2008; Koh, 2011). La viscosidad es la propiedad más importante del biodiésel, ya que afecta el funcionamiento del equipo de inyección de combustible; particularmente a bajas temperaturas la viscosidad es un problema, ya que ésta aumenta y afecta la fluidez del combustible. Los valores de viscosidad de los ésteres metílicos del aceite disminuyen considerablemente después de la transesterificación (Demirbas, 2008). Según la Tabla II, el contenido de acidez del aceite de piñón, que representa la presencia de ácidos grasos libres, fue de 2,53%. Y mediante esterificación del aceite con ácido sulfúrico y metanol durante una hora, la acidez inicial fue reducida en un 83,3%; es decir, se redujo hasta una acidez de 0,423%. No obstante, para el metóxido de sodio la acidez no fue problema alguno cuando se utilizó una dosis de 1,18% de catalizador. Para los metóxido de calcio, las condiciones fueron adversas debido a la presencia de cantidades de agua en la mezcla (Fukuda *et al.*, 2001).

La Fig. 3A muestra al biodiésel en tubos de ensayo producido

TABLA II
CALIDAD DE ACEITE DE PIÑÓN Y BIODIÉSEL

Material	Reacción	% Ac.	IA	Dens.	Viscos.
Aceite	No esterific.	2,530	5,034	930	31,0
Biodiésel	No esterific.	0,423	0,841	880	2,0
Aceite	Esterific.	0,423	0,841	900	24,0
Biodiésel	Esterific.	0,283	0,563	870	1,0

% Ac. = % acidez, IA = Índice de acidez mg KOH/g aceite, Dens. = Densidad kg/m³, Viscos. = Viscosidad cinemática mm²/s. Los datos del biodiésel fueron obtenidos utilizando metóxido de sodio como catalizador

con NaOH 1,18% m/m como catalizador. El tubo de la izquierda es un biodiésel obtenido de aceite de piñón con una acidez de 2,53%. El tubo de la derecha es un biodiésel el cual fue obtenido de una esterificación-transesterificación. La diferencia de ambos radica en la turbidez. El biodiésel sin esterificación presenta mayor turbidez. Este factor de calidad aumenta la densidad y por ende aumenta la viscosidad del producto, disminuyendo su valor comercial.

Según la Fig. 3B, el biodiésel en tubos de ensayo fue producido a partir de aceite de piñón sin esterificación y con el catalizador NaOH. En este caso, con una dosis menor de apenas 0,18% menos que en el tratamiento anterior de NaOH 1,18% m/m. Se observa la formación de jabón y glicerol. Es decir, esta dosis de catalizador de 1,0% fue ineficiente para la transesterificación, convirtiéndose en otro de los factores limitantes que hemos propuesto discutir en el presente trabajo.

La saponificación se repitió según resultados de la Fig. 3C: el tubo de ensayo a la izquierda fue de un proceso con óxido de calcio 1,0% m/m como catalizador; mientras que el tubo de la derecha, de un proceso con hidróxido de calcio 1,0% m/m. En ambos casos, se utilizó aceite de piñón con acidez de 2,53%. En la Fig. 3D, se presentan muestras con una dosis mayor de óxido de calcio (1,10% m/m), a partir de aceite esterificado (Acidez 0,423%). El mismo resultado de saponificación ocurrió cuando se aumentó la dosis de hidróxido de calcio con aceite esterificado y no esterificado (Fig. 3E). Estos resultados confirman que, ni la pureza ni la dosis del metóxido de calcio, y tampoco la acidez del aceite de piñón sean influencias en que la transesterificación se produzca. Para el caso del NaOH, la dosis de catalizador sí fue relevante, sin importar la acidez del aceite de piñón.

Consecuentemente, según los resultados experimentales, son otros los factores que inciden en la saponificación del aceite cuando se utilizan óxido e hidróxido de calcio. El óxido de calcio es uno de los catalizadores básicos (Entre la zeolita, carbonato de calcio, hidróxido de calcio, hidrotalcita y demás) que ha mostrado una mayor actividad de transesterificación en otros trabajos (Granados *et al.*, 2007; Kouzu, Tsunomori, Yamanaka, & Hidaka, 2010; Kouzu, Yamanaka, Hidaka, & Tsunomori, 2009). Sin embargo, este éxito fue bajo ambientes controlados con helio o nitrógeno, lo cual a escala industrial aumentaría el costo de producción. Como cualquier otro catalizador básico, sus sitios activos en la superficie sufren el llamado envenenamiento frente a una atmósfera húmeda. Un ambiente que contenga dióxido de carbono y agua afecta negativamente al catalizador, a pesar de que el mecanismo de reacción es todavía desconocido (Kouzu *et al.*, 2008). No obstante, la utilización de catalizadores heterogéneos representa ventajas económicas y ambientales frente a catalizadores homogéneos (Kamel, 2018). En el presente caso, se estudió la adición de óxido e hidróxido de calcio con el propósito de determinar las condiciones mínimas de la transesterificación utilizando catalizadores con potencial de trabajo en mezcla heterogénea. De esta forma, la recuperación del catalizador promueve la reducción de costos de producción.

El biodiésel se caracteriza por su viscosidad, densidad,

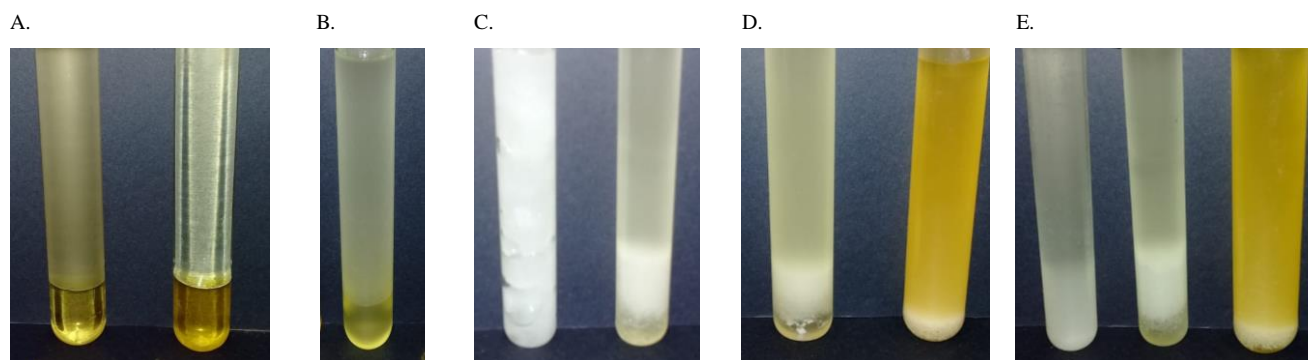


Fig. 3. Muestras de (A) biodiésel obtenido de aceite no esterificado (izquierda) y de aceite esterificado (derecha); (B) muestra de aceite esterificado en reacción con NaOH 1,0% m/m donde no se completó la reacción; (C) muestras de aceites no esterificados en presencia de catalizadores de (izquierda) óxido de calcio y (derecha) hidróxido de calcio; (D) muestras de aceites esterificados en presencia de los catalizadores (izquierda) óxido de calcio y (derecha) hidróxido de calcio; (E) muestras de aceite no esterificado en presencia de (izquierda) 2% hidróxido de calcio y (medio) 1% hidróxido de calcio, (derecha) aceite esterificado con 1% hidróxido de calcio. El color naranja de esta última muestra es característico del resultado positivo de la esterificación.

número de cetano, rango de destilación, punto de inflamación, contenido de cenizas, contenido de azufre, residuo de carbono, índice de acidez, corrosión del cobre y capacidad calorífica (Chhetri *et al.*, 2008). Una de las variables que afectan el rendimiento de la transesterificación es la relación molar de alcohol a aceite. Una cantidad en exceso de metanol favorece la reacción y aumenta la producción de biodiésel. Valores de 4:1 a 10:1 de relación molar metanol a aceite han sido reportados (Tabla III). Según la mencionada tabla, el mayor rendimiento de biodiesel se observa a 5:1 y 6:1 cuando se utiliza KOH como catalizador al 0,1 y 1,0% m/m respectivamente. Aunque, un exceso de metanol disminuye el rendimiento de producción de biodiesel (Kamel, 2018), en el presente trabajo una relación 10:1 no disminuyó el rendimiento de producción. Excesos de metanol permiten la disolución de glicerol en el biodiesel lo que complica el proceso de separación y así se disminuye el rendimiento del biodiesel.

hollín. Según otros trabajos, la capacidad calorífica del biodiesel de piñón es de 41 MJ/kg (Kumar & Sharma, 2008).



Fig. 4. Combustión de muestras de (Izquierda) papel con aceite de piñón, (Medio) solo papel, (Derecha) papel con biodiésel.

TABLA III
CONDICIONES DE REACCIÓN DE TRANSESTERIFICACIÓN DE ACEITE DE PIÑÓN

Relación Molar (Alcohol: Aceite)	Catalizador, Cantidad de Catalizador (%) [*]	Condición de reacción óptima	Rendimiento de éster alquílico, %
5:1	NaOH, 1,0%	60°C, 90 min	98
4:1	NaOH, 1,4%	65°C, 120 min	90
9:1	KOH, 2,0%	60°C, 120 min	95
6:1	KOH, 1,0%	65°C, 60 min	99
11:1	KOH, 1,1%	66°C, 120 min	93
5:1	KOH, 0,5%	60°C, 24 min	99
12:1	Alúm., 6,0%	70°C, 360 min	84

^{*}Porcentaje de catalizador en función de la cantidad de biodiésel. Alúm. = Alúmina. Tomado y adaptado de Koh (2011).

En la Fig. 4 (lado derecho, papel humedecido con biodiésel), se aprecia la combustión limpia del biodiésel, lo cual demuestra su alta capacidad calorífica y prácticamente nula formación de

IV. CONCLUSIONES

En búsqueda de disminuir costos de producción de biodiésel, se evaluaron condiciones mínimas de transesterificación. Para ello, se determinaron factores limitantes del uso de los catalizadores óxido e hidróxido de calcio, a diferentes dosis y concentraciones en la transesterificación del aceite de piñón con metanol. Se determinó que la presencia de agua, y contenido reducido de ácidos grasos libres en el aceite de piñón son factores mínimos de inhibición, en comparación con las condiciones atmosféricas de reacción.

La relación molar 10:1 metanol y aceite permitió un rendimiento de 98,9% de biodiésel cuando se utilizó hidróxido de sodio como catalizador (99% de pureza). El mismo rendimiento se obtuvo ya sea con un aceite de acidez 2,53 ó 0,423%. Es decir, la acidez no fue limitante de la transesterificación para el hidróxido de sodio.

En perspectiva, evitar el envenenamiento de catalizadores heterogéneos es todavía objeto de estudio en la búsqueda de recuperación de catalizadores del medio de reacción.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración de Wilmer Ponce (Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, INIAP); Eudaldo Loor y Jorge Tecas (Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí "Manuel Félix López", ESPAM-MFL) en la consecución de los resultados aquí reportados.

REFERENCIAS

- [1] Agarwal, A. K. (2017). Potential and challenges for large-scale application of biodiesel in automotive sector. *Progress in Energy and Combustion Science*, 37.
- [2] Berchmans, H. J., & Hirata, S. (2008). Biodiesel production from crude *Jatropha curcas* L. seed oil with a high content of free fatty acids. *Bioresource Technology*, 6.
- [3] Bhattacharya, M. (2016). The effect of renewable energy consumption on economic growth: Evidence from top 38 countries. *Applied Energy*, 9.
- [4] Bilgili, F. (2016). The dynamic impact of renewable energy consumption on CO2 emissions_ A revisited Environmental Kuznets Curve approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8.
- [5] Chavan, S. B., Kumbhar, R. R., Madhu, D., Singh, B., & Sharma, Y. C. (2015). Synthesis of biodiesel from *Jatropha curcas* oil using waste eggshell and study of its fuel properties. *RSC Advances*, 5(78), 63596-63604. <https://doi.org/10.1039/C5RA06937H>
- [6] Chhetri, A. B., Watts, K. C., & Islam, M. R. (2008). Waste Cooking Oil as an Alternate Feedstock for Biodiesel Production. 16.
- [7] De Angelis, G., Medeghini, L., Conte, A. M., & Mignardi, S. (2017). Recycling of eggshell waste into low-cost adsorbent for Ni removal from wastewater. *Journal of Cleaner Production*, 164, 1497-1506.
- [8] Demirbas, A. (2008). Biodiesel: A realistic fuel alternative for diesel engines. London: Springer.
- [9] Fukuda, H., Kondo, A., & Noda, H. (2001). Biodiesel fuel production by transesterification of oils. *Journal of bioscience and bioengineering*, 92(5), 405-416.
- [10] García-Muentes, S., Lafargue-Pérez, F., Labrada-Vázquez, B., Díaz-Velázquez, M., & Sánchez del Campo-Lafita, A. (2018). Propiedades físicoquímicas del aceite y biodiesel producidos de la *Jatropha curcas* L. en la provincia de Manabí, Ecuador. *Rev Cub Quim* vol. 30 no.1 Santiago de Cuba.
- [11] Gerpen, J. V. (2005). Biodiesel processing and production. *Fuel Processing Technology*, 11.
- [12] Gori, F., Ludovisi, D., & Cerritelli, P. (2007). Forecast of oil price and consumption in the short term under three scenarios: parabolic, linear and chaotic behaviour. *Energy*, 32(7), 1291-1296.
- [13] Granados, M. L., Poves, M. D. Z., Alonso, D. M., Mariscal, R., Galisteo, F. C., Moreno-Tost, R. Fierro, J. L. G. (2007). Biodiesel from sunflower oil by using activated calcium oxide. *Applied Catalysis B: Environmental*, 73(3-4), 317-326. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2006.12.017>
- [14] Harvey, L. D. (2016). Global warming. Routledge.
- [15] Hirsch, R. L., Bezdek, R. M., & Wendling, R. M. (2005). Peaking of world oil production: impacts, mitigation, & risk management. National Energy Technology Laboratory (NETL), Pittsburgh, PA, Morgantown, WV
- [16] Hosseinzadeh-Bandbafha, H. (2018). A comprehensive review on the environmental impacts of diesel/biodiesel additives. *Energy Conversion and Management*, 36.
- [17] Hueriga, I. R. (2014). Biodiesel production from *Jatropha curcas*: Integrated process optimization. *Energy Conversion and Management*, 9.
- [18] Juan, J. C. (2011). Biodiesel production from jatropha oil by catalytic and non-catalytic approaches: An overview. *Bioresource Technology*, 9.
- [19] Kamel, D. A. (2018). Smart utilization of jatropha (*Jatropha curcas* Linnaeus) seeds for biodiesel production_ Optimization and mechanism. 8.
- [20] Koh, M. Y. (2011). A review of biodiesel production from *Jatropha curcas* L. oil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12.
- [21] Kouzu, M., Kasuno, T., Tajika, M., Sugimoto, Y., Yamanaka, S., & Hidaka, J. (2008). Calcium oxide as a solid base catalyst for transesterification of soybean oil and its application to biodiesel production. *Fuel*, 87(12), 2798-2806.
- [22] Kouzu, M., Tsunomori, M., Yamanaka, S., & Hidaka, J. (2010). Solid base catalysis of calcium oxide for a reaction to convert vegetable oil into biodiesel. *Advanced Powder Technology*, 21(4), 488-494. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2010.04.007>
- [23] Kouzu, M., Yamanaka, S., Hidaka, J., & Tsunomori, M. (2009). Heterogeneous catalysis of calcium oxide used for transesterification of soybean oil with refluxing methanol. *Applied Catalysis A: General*, 355(1-2), 94-99. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2008.12.003>
- [24] Kulkarni, M. G., & Dalai, A. K. (2006). Waste Cooking Oils An Economical Source for Biodiesel: A Review. *Ind. Eng. Chem. Res.* 45, 2901-2913.
- [25] Kumar, A., & Sharma, S. (2008). An evaluation of multipurpose oil seed crop for industrial uses (*Jatropha curcas* L.): A review. *Industrial Crops and Products*, 28(1), 1-10.
- [26] Lu, H., Liu, Y., Zhou, H., Yang, Y., Chen, M., & Liang, B. (2009). Production of biodiesel from *Jatropha curcas* L. oil. *Computers & Chemical Engineering*, 33(5), 1091-1096.
- [27] Ma, F., & Hanna, M. A. (1999). Biodiesel production: a review. *Bioresource Technology*, 15.
- [28] Openshaw, K. (2000). A review of *Jatropha curcas*: an oil plant of unfulfilled promise p. *Biomass and Bioenergy*, 15.
- [29] Phan, A. N., & Phan, T. M. (2008). Biodiesel production from waste cooking oils. 7.
- [30] SASTA. (2015). Method 11.1 – Miscellaneous: available calcium oxide (CaO) in lime. Recuperado de <https://sasta.co.za>
- [31] Serio, M. D., Tesser, R., Pengmei, L., & Santacesaria, E. (2008). Heterogeneous Catalysts for Biodiesel Production. *Energy & Fuels*, 22, 207-217, 11.
- [32] Talebian-Kiakalaieh, A., Amin, N. A. S., & Mazaheri, H. (2013). A review on novel processes of biodiesel production from waste cooking oil. *Applied Energy*, 29.
- [33] Tiwari, A. K., Kumar, A., & Raheman, H. (2007). Biodiesel production from jatropha oil (*Jatropha curcas*) with high free fatty acids: An optimized process. *Biomass and Bioenergy*, 7.
- [34] Vicente, G., & Mart, M. (2004). Integrated biodiesel production: a comparison of different homogeneous catalysts systems. *Bioresource Technology*, 9.
- [35] Viriya-empikul, N., Krasae, P., Puttasawat, B., Yoosuk, B., Chollacoop, N., & Faungnawakij, K. (2010). Waste shells of mollusk and egg as biodiesel production catalysts. *Bioresource Technology*, 3.
- [36] Wei, Z., Xu, C., & Li, B. (2009). Application of waste eggshell as low-cost solid catalyst for biodiesel production. *Bioresource Technology*, 3.
- [37] Wright, L. (2006). Worldwide commercial development of bioenergy with a focus on energy crop-based projects. *Biomass and Bioenergy*, 9.
- [38] Yaakob, Z. (2013). Overview of the production of biodiesel from Waste cooking oil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10.



Avellán Álava Ana Lucía E. de Ingenieria Química de Universidad Técnica de Manabí. Técnica de la Consultora Ambiental SOLITEAM de Calceta-Manabí y de la constructora EDICOING (Montecristi-Manabí).



García Muentes Segundo Químico y Farmacia Universidad de Guayaquil, y Dr. Bioquímica y Farmacia Universidad de Machala. Docente Titular Universidad Técnica de Manabí y Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, jefe de laboratorio Clínico "Redox" Rocafuerte.



Burgos Briones Gabriel Antonio Ingeniero Químico de la Universidad Técnica de Manabí, Master en Sistemas Integrales en Gestión UNIR. Coordinador y docente del Departamento de Procesos Químicos de la carrera Ingeniería Química.



Moreira Mendoza Carlos Antonio

Ing. Químico de la Universidad Técnica de Manabí, Magister en Gestión Ambiental de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí. Vicedecano y docente Titular de la carrera Ingeniería Química UTM.



García Vínces Gonzalo Oswaldo.

Licenciado en Química y Biología. Estudios en la Universidad Técnica de Manabí. Analista de Promoción y apoyo al ingreso de la universidad. Técnico de Laboratorio de Química.



Banchón Bajaña Carlos Luis. Ing. Químico, Dipl.-Ing., M.Sc. Chem.-and Bioeng. (FAU Erlangen-Nuremberg, DAAD Alumni). Docente de Ingeniería Ambiental, Universidad Agraria del Ecuador. Expedicionario Antártico (Est. Pedro Vicente Maldonado).